

Kalle Hakonen

PAINETTA KESTÄVÄ ELEKTRONIIKKA

VAKIO-OSILLA, ÖLJYKYLVISSÄ

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Kandidaatintyö
Elokuu 2019

TIIVISTELMÄ

Kalle Hakonen: Painetta kestävä elektroniikka vakio-osilla öljykylvyssä
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Teknisten tieteiden TkK tutkinto-ohjelma
Elokuu 2019

Työn tarkoituksena oli löytää kirjallisuudesta keinoja elektroniikan vakiokomponenttien paineenkeston arvioimiseksi. Tätä tietoa ei ole kootusti saatavilla. Onnistuminen mahdollistaisi edullisempien ja helpommin saatavilla olevien komponenttien käyttämisen paineenalaisissa osissa vedenalaisissa laitteissa sekä hydraulikassa. Tarkoituksena ei ollut saada täyttä varmuutta kaikkien komponenttien toiminnasta paineen alaisena vaan selvittää kannattaako tietyn laitteen paineenkestävyyttä tutkia tarkemmin.

Valmistusmateriaalien vaikutusta paineenkestoon tutkittiin mittojen muutoksen kautta. Välineenä käytettiin perinteisen lujuuslaskennan keinoja. Lähtöarvot valittiin puristus- ja kimmokertoimista niiden helpon saatavuuden vuoksi sekä tavoitepaineesta. Rasituksesta aiheutuvien muutosten kautta voidaan sulkea, liian suurten erojen avulla, pois joitakin materiaalityyppejä.

Ideaalisen sekä tavanomaisen muodon eroja paineenalaisena vertailtiin yksinkertaisen FEM-analyysin avulla. Tarkasteltavana oli terässeinäinen 4 mm³ säiliö. Tällä analyysillä pyrittiin selkeyttämään käsitystä muodon tärkeydestä kaasutilallisten kappaleiden kestävyys. Havaittiin että melko pienellä muodonmuutoksella paineenkestävyys voi parantua tai heikentyä selvästi.

Aineiden sähköisten ominaisuuksien muutoksia paineessa tarkasteltiin eri parametrien kannalta. Termisen diffuusiokertoimen vaikutus toimintaan havaittiin todennäköisesti merkityksettömäksi. Resisttiivisyyden muutos on mahdollista laskea komponenteilla joiden aineen liuskavakio tunnetaan. Laskelmien perusteella tarkemmissa mittauksissa resistanssi voi muuttua liikaa piirin toiminnan kannalta. Kapasitanssiin paineella on vaikutusta mutta tarvittavia lähtötietoja muutoksen laskemiseksi ei löydetty. Löydettyjen tietojen perusteella kapasitanssi kuitenkin kasvaa sekä eristeen läpilyöntikestävyys heikkenee.

Puolijohteiden toimintaan paine vaikuttaa mutta toiminnan arvioimiseksi ei löydetty tarvittavan yksinkertaisia keinoja. Vastaavasti vaikutus induktanssiin havaittiin yleensä merkityksettömäksi. Kvartsikiteen jäykkyyden havaittiin kasvavan paineessa, jolloin sen ominaisresonanssitaajuus myös kasvaa. Ilmiön suuruuden arvioimiseksi ei myöskään löydetty tarvittavaa määrää tietoa.

Komponenttien paineenkestävyydestä etsittiin mainintoja erilaisista julkaisuista. Tietoa oli saatavilla rajoitetusti mutta eri lähteitä yhdistämällä oli mahdollista löytää komponenttityyppejä jotka toimivat paineenalaisina. Varsinaisia maksimipaineita ei saatu määritettyä vaikkakin vastukset, kelat ja puolijohteet havaittiin parhaiten painetta kestäviksi. Komponenttiryhmistä kondensaattorien ja kiteiden paineenkestävyys vaihtelee eniten ryhmänsä sisällä ja niiden käyttö vaatii tarkempaa perehtymistä tutkittavaan komponenttiin.

Lopputuloksena voidaan kuitenkin todeta, että edellytykset monimutkaisemman elektronisen laitteen toiminnalle paineenalaisena ovat olemassa. Tämä saattaa vaatia tarkkuutta suunnittelussa. Toisaalta monet yleiset komponentit ovat painetta kestäviä ja on mahdollista valmistaa luonnostaan jonkin verran painetta kestävä laite jopa vahingossa.

Avainsanat: Painetta kestävä elektroniikka, pressure tolerant electronics

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ALKUSANAT

Vakio-osien hyödyntäminen suunniteltua korkeammassa paineessa on kiinnostanut minua jo pitkään. Kiinnostus on kasvanut vuosien aikana työskennellessäni vedenalaisten laitteiden parissa ja kun löysin yliopistolta sopivan kohderyhmän, oli kandityön aiheen valinta helppoa.

Tiedon keräämisessä on ollut suureksi avuksi keskustelut useiden yritysten edustajien ja yksityisten henkilöiden kanssa. Ohjaajani Olli Usenius on kannustanut minua eteenpäin työn eri vaiheissa ja antanut arvokasta palautetta. Kiitokset kaikille osallisille.

Tampereella, 02.08.2019

Kalle Hakonen

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO.....	1
2. PAINEENKESTO.....	2
2.1 Materiaalien paineenkesto.....	2
2.2 Rakenteiden paineenkesto.....	4
2.3 Paineen vaikutus sähköisiin ominaisuuksiin.....	6
3. PERUSKOMPONENTTIEN PAINEENKESTO.....	10
3.1 Vastus.....	10
3.2 Kondensaattori.....	11
3.3 Kela.....	12
3.4 Puolijohde.....	12
3.5 Oskillaattori.....	14
4. YHTEENVETO.....	17
LÄHTEET.....	19

KUVALUETTELO

<i>Kuva 1: Pallon mallisen kappaleen turvakertoimet von Mises -jännitysten mukaan 30,3 MPa paineessa.....</i>	<i>5</i>
<i>Kuva 2: Kuution mallisen kappaleen turvakertoimet von Mises -jännitysten mukaan 20,2 MPa paineessa.....</i>	<i>6</i>
<i>Kuva 3: Kiteen ekvivalenttipiiri Van Dyken mallin mukaan.....</i>	<i>9</i>
<i>Kuva 4: Paksukalvovastuksen rakenne. [55].....</i>	<i>10</i>
<i>Kuva 5: Tantaalielektrolyyttikondensaattori. [56, s. 2].....</i>	<i>12</i>
<i>Kuva 6: SOT-23 -kotelon sisäinen rakenne. [57].....</i>	<i>13</i>
<i>Kuva 7: Mikropiiri jonka ympärillä on kaasutila BGA-kotelossa. [44, s. 105].....</i>	<i>14</i>
<i>Kuva 8: Auki leikattu oskillaattori, josta on nähtävissä suuri ilmatila. [58].....</i>	<i>15</i>
<i>Kuva 9: Signaalin suhteellinen voimakkuus eri oskillaattoreilla 60 MPa paineessa. [46].....</i>	<i>15</i>

LYHENTEET JA MERKINNÄT

PTE	<i>engl. pressure tolerant electronics</i> , painetta kestävä elektroniikka
R	vastus
C	kondensaattori
L	kela
K	<i>engl. bulk modulus</i> tai <i>modulus of compression</i> , puristuskerroin
B	puristuskertoimen tunnus joissain lähteissä
E	<i>engl. shear modulus</i> , kimmokerroin.
Y	kimmokertoimen tunnus joissain lähteissä
paineenkesto	<i>engl. pressure tolerance</i>
SMD	<i>engl. surface-mount device</i> , pintaliitoskomponentti
FEM	<i>engl. Finite Element Method</i> , elementtimenetelmä
MEMS	<i>engl. Microelectromechanical Systems</i> , Mikrosysteemi

1. JOHDANTO

Elektroniikka muuttuu jatkuvasti monimutkaisemmaksi. Samalla sen avulla suoritettavat tehtävät monipuolistuvat jolloin sekä prosessit että laitteistot ovat yhä riippuvaisempia elektroniikasta. Vedenpinnan alapuolella siirretään sähköä ja tietoa. Öljyä porataan merellä [1] ja pumpataan pois uponneista laivoista [2]. Vedellä täyttyneitä kaivoksia tutkitaan [3] ja juomavettä siirretään suurissa tunneleissa [4, s. 46]. Hydraulisylinterien asentoa ja kuntoa mitataan [5]. Kaikissa näissä kohteissa älykkäämpi, pienempi edullisempi ja mahdollisesti luotettavampi elektroniikka voisi olla käyttökelpoista.

Haluttaessa saattaa elektronisia laitteita ja komponentteja toimimaan suunniteltua korkeammassa paineessa on yleisesti tapana koteloida ne siten, että komponentteihin kohdistuva paine ei juurikaan ylitä yhden ilmakehän painetta. Ulkoisen paineen kasvaessa esimerkiksi arvoon 30 MPa kotelon itsensä vaatima tila kasvaa huomattavasti, seinämävahvuuden kasvaessa, suhteessa sen suojelemaan laitteistoon nähden. Tämä lisää sekä kokonaisuuden painoa että kustannuksia.

Toinen yleinen keino on käyttää painetta kestäviksi suunniteltuja laitteita. Usein nämä koteloidaan kevyeen öljyllä täytettyyn koteloon. Öljy ei ole yhtä kokoonpuristuvaa kuin kaasut, jolloin kotelon tehtäväksi jää öljyn pitäminen laitteen ympärillä. Elektroniikkakäyttöön soveltuvia dielektrisiä öljyjä on helposti saatavilla. Tällaiset painetta sietävät laitteistot ovat huomattavasti arvokkaampia kuin normaalipaineeseen suunnitellut vastineensa. Hintaero voi olla satakertainen. Esimerkiksi Ethernet-liikennettä kuparijohdosta valokuituun siirtävän mediamuuntimen tapauksessa painetta sietävän laitteen hinnaksi saatiin tarjouksen perusteella noin 3 000 € ja toimitusajaksi seitsemän viikkoa. Vastaavan toiminnallisuuden toteuttava laite on samaan aikaan saatavilla suomalaisessa kaupassa 26,50 € yhden viikon toimitusajalla.

Tässä työssä etsitään keinoja tavallisten vakio-osien paineenkeston arvioimiseksi. Tätä tietoa on saatavilla rajoitetusti, ja edes komponenttien tai laitteiden valmistajilla ei yleisesti ole keinoja auttaa arvioinnissa. Komponentteja oletetaan käytettäväksi öljykylvyssä, koska tämä on hyväksi osoittautunut vakiintunut käytäntö.

Asiaa tarkastellaan aluksi valmistusmateriaalien mekaanisten ominaisuuksien kautta. Tällä pyritään nopeaan poissulkemiseen arvioinnissa. Luvussa 3 käsitellään yleisiä elektroniikan komponentteja tyyppi kerrallaan. Tässä vaiheessa tuodaan esiin saatavilla olevia tuloksia ja niistä mahdollisesti tehtäviä johtopäätöksiä.

Tässä työssä ei tutkita korkean paineen pitkäaikaisia eikä painenvaihtelun aiheuttamia muutoksia ominaisuuksissa.

2. PAINEENKESTO

Jotkin aineiden ominaisuuksista muuttuvat paineen muuttuessa [6, s. 371]. Muodonmuutoksen lisäksi muutoksia tapahtuu myös sähköisissä ominaisuuksissa [7]. Paineen vaikutusta eri materiaaleihin voidaan arvioida useiden muuttujien avulla. Tässä työssä keskitytään muuttujiin joilla arvellaan olevan vaikutusta komponentin elektronisiin parametreihin ja olemassa olevien komponenttien ominaisuuksiin. Tarkasteltava painealue alkaa ilmakehän paineesta 101 kPa. Tavoitepaine valittiin merten syvimmän paikan eli Challengerin syvänteen mukaan, jonka pohjalla paine on noin 110 MPa [8]. Turvakertoimet huomioon ottaen 150 MPa on tämän työn painealueen yläraja.

2.1 Materiaalien paineenkesto

Nesteessä paine kohdistuu tasaisesti upotettuun kappaleeseen. Tarkasteltavan kappaleen ollessa valmistettu yhdestä tasalaatuisesta aineesta voidaan paineen kestävyyttä arvioida aineen puristuskertoimen avulla. Puristuskerroin voidaan laskea seuraavan kaavan mukaan [6, s. 374–375]:

$$K = \frac{\Delta p}{\Delta V/V_0}, \quad (1)$$

jossa Δp on paineen muutos, ΔV tilavuuden muutos ja V_0 alkuperäinen tilavuus. Valitaan metallien arvioinnissa tavallinen 0,2 %:n muutos pituudessa, josta saadaan laskettua tilavuuden muutos

$$\Delta V = -(1 - 0,002)^3 + 1 = 0,006. \quad (2)$$

Alkuperäisen tilavuuden V_0 ollessa 1, kaava saadaan muotoon

$$\Delta p = 0.006 K. \quad (3)$$

Tässä Δp on suurin käyttökelpoinen paine tutkittavalle aineelle. Koska puristuskertoimia löytyy taulukoituna, voidaan maksimipaine laskea valitun tilavuuden muutoksen rajoissa. Taulukkoon 1 on laskettu arvot joillekin materiaaleille.

Taulukko 1: Puristuskertoimia [9, s. 365][10] ja niistä laskettuja maksimipaineita.

Materiaali	Puristuskerroin K (GPa)	Maksimipaine (MPa)
Teräs	160	960
Kupari	140	840
Lasi	31	186
Lyijy	7,7	46,2
Pii	97,8	586,8
Alumiini	70	420

Puristuskertoimen käyttäminen elektroniikan komponenttien sopivuuden arvioimiseksi paineistettuna ei ole tarkkaan määritelty, ja siten ei ole mielekästä laskea tarkkoja arvoja. Lisäksi taulukoituna on usein ainoastaan aineen kimmokerroin. Puristuskerroin K voidaan kuitenkin usein arvioida kimmokertoimen E avulla siten, että metalleille, keraameille ja lasille

$$K = E \quad (4)$$

sekä polymeereille ja elastomeereille

$$K = 10 E \quad [11, \text{s. } 8]. \quad (5)$$

Taulukko 2: Kimmokertoimia [9, s. 365][10][12, s. 186] ja niistä laskettuja puristuskertoimia sekä maksimipaineita.

Materiaali	Kimmokerroin E (GPa)	Puristuskerroin K_{arvioitu} (GPa)	Maksimipaine (MPa)
Teräs	200	200	1200
Kupari	110	110	660
Lasi	55	55	330
Lyijy	15	15	90
Pii	130	130	780
Alumiini	70	70	420
Epoksi + lasikuitu	175	>175	>1050

Taulukossa 2 Cardarellin esittämän puristuskertoimen arviointikaavan avulla saaduissa tuloksissa suurin virhe muodostuu lyijyllä. Virheen seurauksena näyttää, että lyijy olisi sovelias kaksi kertaa suuremmassa paineessa kuin tarkemmin määritellyn puristuskertoimen avulla arvioitiin. Arviointimenetelmän epätarkan luonteen mukaisesti tämä on kuitenkin käyttökelpoinen tarkkuus nopeaan arviointiin erityisesti silloin, kun taulukoitua puristuskerrointa ei ole saatavilla. Näin voidaan esimerkiksi arvioida epoksista ja lasikuidusta valmistetun FR-4 -piirilevylaminaatin puristuskerroin.

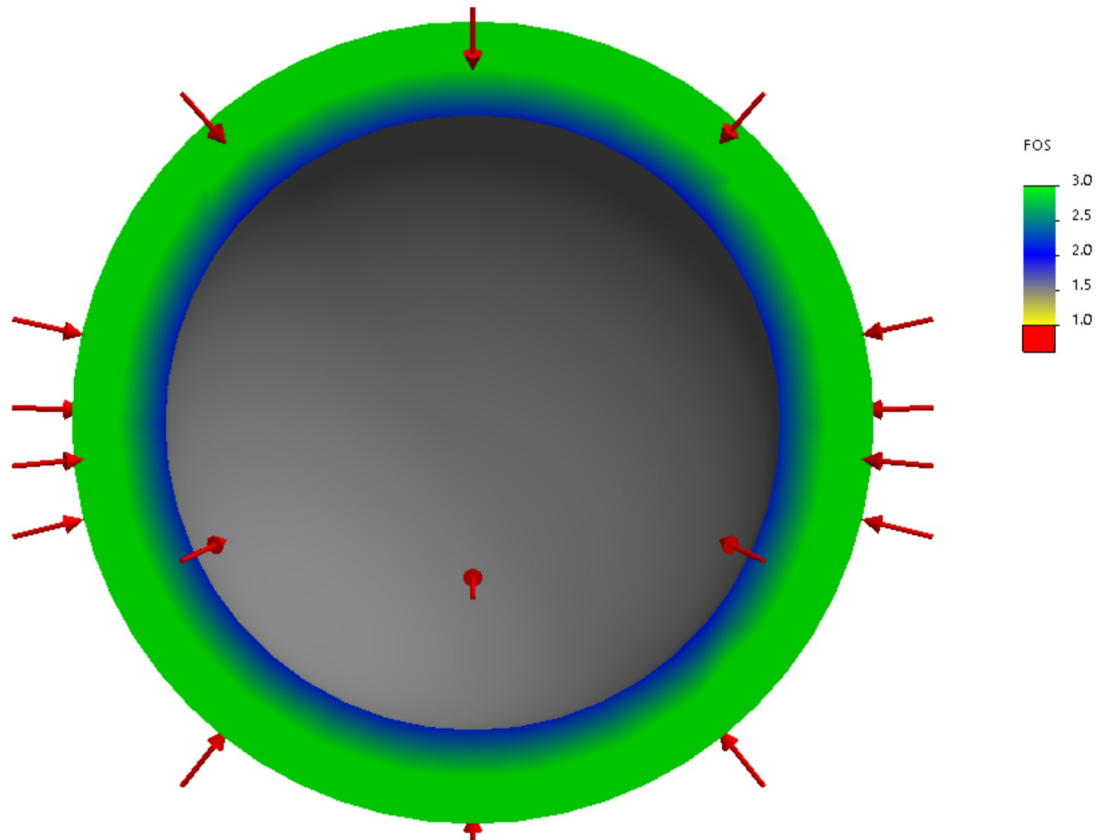
Tällä tavoin arvioituna ei saada varmuutta komponentin sopivuudesta alkuperäistä kohdeympäristöä korkeammassa paineessa. Tarkastelun avulla voidaan kuitenkin sulkea pois niitä materiaaleja, joilla on liian suuri tilavuuden muutos tavoitepaineessa. On hyvä huomata, että joidenkin synteettisten materiaalien kimmokerroin muuttuu useita kertaluokkia lämpötilan vaikutuksesta jo alueella 0–100°C [13, s. 323]. Myös materiaalipareja, joiden mitat käyttäytyvät eri tavalla, on syytä tutkia tarkemmin [14, s. 114]. Tässä valittu 0,2 % pituuden muutoksen vaikutus sähköisiin ominaisuuksiin ei perustu tutkimukseen, jota ei löydetty, vaan ainoastaan vakiintuneeseen käytäntöön lujuuslaskennassa. On mahdollista löytää paremmin sähköisten komponenttien ominaisuuksiin liittyvä vertailuarvo. Arvon löytymiseen ei kuitenkaan tässä työssä pyritä.

2.2 Rakenteiden paineenkesto

Komponenttien muoto vaikuttaa osaltaan niiden paineen kestävyyskykyyn. Mikäli kappale ei ole valmistettu ainoastaan yhdestä aineesta ja se sulkee sisäänsä kokoonpuristuvampaa ainetta tai kaasutilan, kohdistuu paineen rasitus ulkokuoren sisäpintaan. [15]

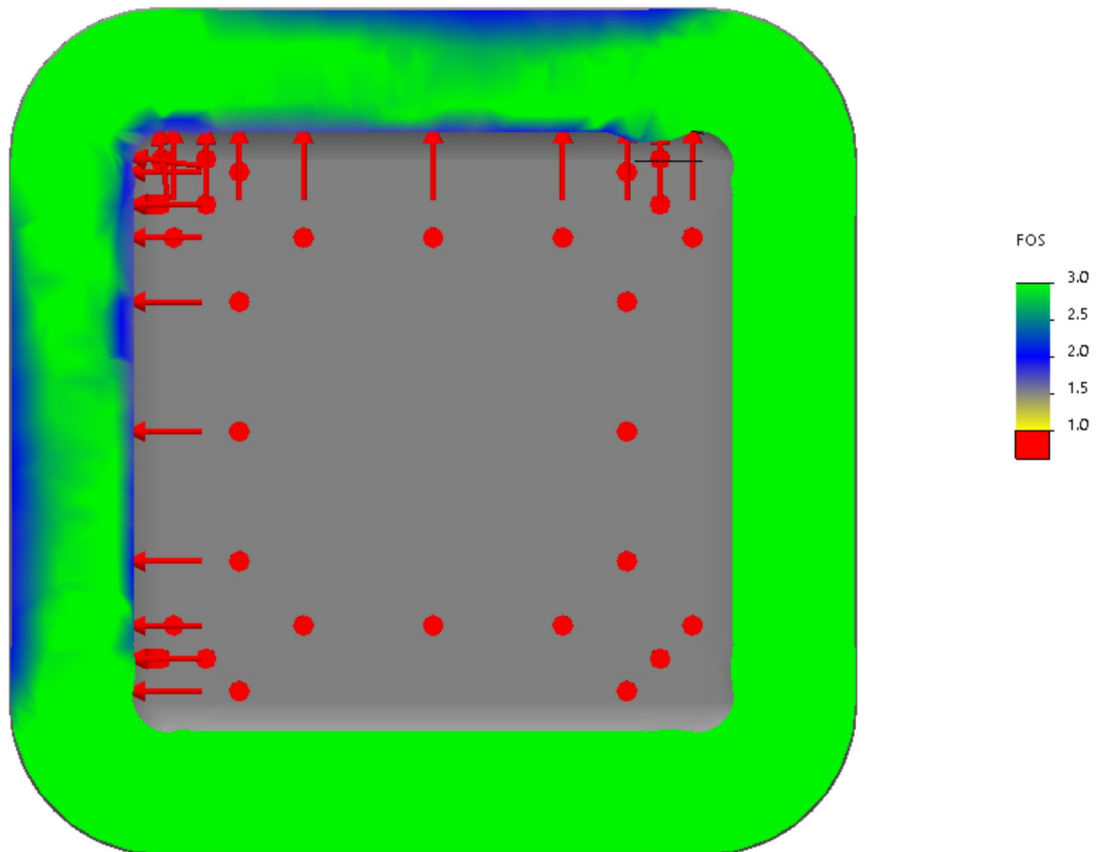
Muodon vaikutusta kaasutilan sisältävän kappaleen kestävyyskykyyn tarkasteltiin Solidworks Simulation -ohjelmiston avulla. Vertailua varten mallinnettiin 2 kappaletta. Kummankin kappaleen sisätilavuudeksi määriteltiin 4 mm³ sekä seinämän vahvuudeksi 0,3 mm. Materiaaliksi tarkasteluun valittiin EN 1.4404 eli haponkestävä teräs.

Odotetusti kuvan 1 mukaan jännitykset jakaantuvat pallolla tasaisesti. Turvakertoimen ollessa pienimmillään noin 2. Harvat komponentit ovat kuitenkin täydellisiä palloja.



Kuva 1: Pallon mallisen kappaleen turvakertoimet von Mises -jännitysten mukaan 30,3 MPa paineessa.

Seuraavassa simuloinnissa laskenta suoritettiin kuvan 2 mukaisella kappaleella. Jotta turvakerroin saatiin noin kahdeksi, pudotettiin ulkoinen paine 30,3 MPa:sta kokeilemalla arvoon 20,2 MPa. Kuution reunat ovat vahvasti pyöristetyt. Tällä tavalla haluttiin päästä lähemmäksi todellista tilannetta. Odotusten vastaisesti kaikki seinämät eivät reagoineet simuloinnissa paineeseen samalla tavoin. Syyksi arveltiin simulointiohjelmiston asettaman elementtiverkon epäsymmetrisyyttä.



Kuva 2: Kuution mallisen kappaleen turvakertoimet von Mises -jännitysten mukaan 20,2 MPa paineessa.

Muotoon perustuvan arvioinnin avulla voidaan valita sähköisesti toisiaan vastaavista komponenteista paremmin painetta kestävä. Kaasutilattomilla komponenteilla tällä ei kuitenkaan ole merkitystä.

2.3 Paineen vaikutus sähköisiin ominaisuuksiin.

Paineen vaikutus komponentin sähköisiin ominaisuuksiin perustuu sekä aineen ominaisuuksiin että rakenteellisten mittojen muutoksiin. Paine muuttaa ainakin aineen lämmönsiirto-ominaisuuksia [16, s. 105] samoin kuin resistiivisyyttä [17, s. 35]. Kuparilla termisen diffuusiokertoimen muutos valitulla 150 MPa:n paineella on noin 1 %. Muutos on pieni ja positiivinen, joten tällä ei luultavasti ole merkitystä komponentin paineenkestävyydelle.

Resistanssin muutosta voidaan arvioida mittojen muutoksen sekä aineen liuskavakion, k , avulla:

$$k = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l} \quad (6)$$

Missä R on resistanssi ja l on pituus [18, s. 284]. Mikäli suurimman sallitun pituuden muutoksena käytetään aiemmin mekaanisen kestävyuden rajaksi valittua 0,2 % ja oletetaan k tunnetuksi, saadaan kaava muotoon

$$\Delta R = \frac{2kR}{100}. \quad (7)$$

Tällä tavalla voidaan laskea resistanssin muutos mekaanisen kestävyuden rajoittamassa paineessa. On myös mahdollista laskea suurin pituuden muutos, kun suurin sallittu resistanssin muutos on tiedossa:

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{\Delta R/R}{k} \quad (8)$$

Taulukossa 3 on esitetty joitakin venymäliuskoille tyypillisiä liuskavakioita. Venymäliuskoja valmistettaessa liuskavakio pyritään saamaan mahdollisimman suureksi, joten paineenkestoa arvioitaessa niitä voidaan pitää turvallisena valintana.

Taulukko 3: Tyypillisiä liuskavakioita. [18]

Materiaali	k
Ohutmetallifilmi	2-5
Paksukalvovastus	5-20
Puolijohde	50

Kun tiedetään resistanssin suurin sallittu muutos, voidaan laskea suurin mahdollinen käyttöpaine. Tarkastellaan esimerkiksi kuparisen paksukalvovastuksen resistanssia. Taulukosta valitaan suurin liuskavakion arvo. Resistanssin muutoksen rajaksi valitaan 0,2 %. Arvot sijoitetaan kaavaan 9

$$\Delta l/l = \frac{0,002}{20} = 0,01\% \quad (9)$$

jolloin saadaan pituuden muutos resistanssin rajoittamana.

Taulukossa 1 saatiin 0,2 % muodonmuutoksella suurimmaksi käyttöpaineeksi 840 MPa. Nyt voidaan laskea käyttöpaine resistanssin muutoksen rajoittamana:

$$p_{max} = 840 \text{ MPa} \frac{0,01\%}{0,2\%} = 42 \text{ MPa}. \quad (10)$$

Kondensaattorin kapasitanssi määräytyy napojen pinta-alan ja etäisyyden sekä eristeen permittiivisyyden avulla kuten kaavassa 11 [19, s. 73].

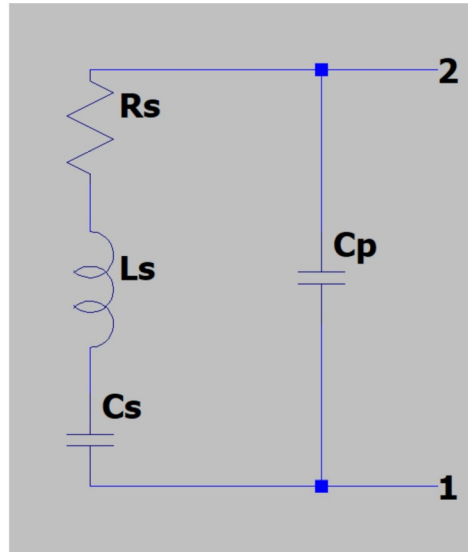
$$C = \frac{\epsilon A}{d} \quad (11)$$

Ulkoisen paineen kasvaessa navat siirtyvät lähemmäksi toisiaan. Tästä seuraa kapasitanssin kasvu sekä jännitteen keston aleneminen. Tällöin suurin merkitys on napojen välisen eristeen ominaisuuksilla. Useilla aineilla suhteellinen permittiivisyys kasvaa paineen kasvaessa. Tämäkin kasvattaa kapasitanssia. Kaikilla aineilla näin ei kuitenkaan tapahdu [20][21]. Muutoksen laskeminen vaatisi siten eristeen puristuskertoimen selvittämistä sekä tiedon permittiivisyyden muutoksesta paineessa. Kiinteille aineille ei löydetty taulukoitua tietoa permittiivisyyden muutoksesta, joten vaihtoehtoina kapasitanssin muutoksen selvittämiseksi on joko jättää permittiivisyyden muutos huomiotta tai selvittää muutoksen suunta ja suuruus.

Kela koostuu sähköön johtimesta kahden terminaalien välillä. Paine vaikuttaa hieman metallien resistanssiin ja siten osaltaan kelan toimintaan. Induktanssin muutosta voidaan tarvittaessa arvioida johtimen mittojen muutoksista. 150 MPa:n paine kuparilla aiheuttaa 0.04 % pituuden muutoksen ja tämän vaikutus induktanssiin on yleensä merkityksetön. Kelan kolmiulotteinen muoto on myös tärkeä induktanssin selvittämisessä. Mikäli johtava materiaali on kiinnitetty komponentin runkoon, voi rungon mittojen muutos aiheuttaa suurta vaihtelua nimelliseen arvoon verrattuna. Toisaalta muutos voi olla myös merkityksettömän pieni.

Joillakin puolijohteilla paineen kasvaminen kasvattaa resistiivisyyttä ja pienentää permittiivisyyttä [21]. Puolijohteiden fysiikan arviointi on kuitenkin liian monimutkaista tässä arvioitavaksi. Se vaatisi myös tarkempaa tietoa itse rakenteista sekä seostamisesta. Käytännössä joudutaan tukeutumaan mitattuihin toiminnan muutoksiin.

Kiteen käyttö elektroniikassa perustuu sarjaresonanssin ominaisvärähtelytaajuuteen, jolloin sen impedanssi lähestyy nollaa [19, s. 518–519]. Kuvassa 3 on esitettyinä standardin EN 50324-2 suosittelema Van Dyken ekvivalenttipiiri [22].



Kuva 3: Kiteen ekvivalenttipiiri
Van Dyken mallin mukaan.

Koska paineen alla resistanssi pienenee, induktanssi pysyy samana ja kapasitanssi suurenee voimme arvioida muutoksen suuntaa ja suuruutta. Sarjaresonanssitaajuus saadaan laskettua kaavan 12 avulla.

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C_s}} \quad (12)$$

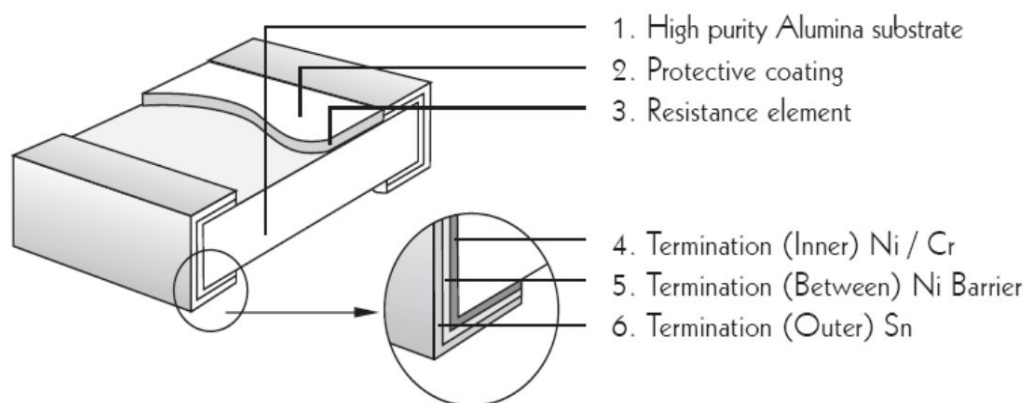
Tällä perusteella kun C kasvaa niin taajuus pienenee. Tämä on ristiriidassa kokeellisten mittausten kanssa [23]. Van Dyken mallia ei siis voida näin yksinkertaistettuna käyttää paineenkeston arvioinnissa. Mallissa parametrit C_s ja L_s eivät kuitenkaan määräydy yksittäisten komponenttien tavoin vaan kiteen fyysisen käyttäytymisen mukaan. Kiteen jäykkyys kasvaa paineen kasvaessa, jolloin C_s pienenee ja ristiriitaa mittauksien kanssa ei ole [24]. Kiteen arvioinnissa saattaisi olla avuksi mekaaniset ominaisuudet paremmin huomioon ottava malli [25][26].

3. PERUSKOMPONENTTIEN PAINEENKESTO

Elektroniikan peruskomponentteja ovat vastukset, kondensaattorit ja kelat. Vuonna 2019 monet laitteet sisältävät myös puolijohteita, joista osa tarvitsee toimiakseen kellosignaalin joka tuotetaan usein kideoskillaattorin avulla. Tässä kappaleessa käydään läpi kyseisten komponenttien sopivuutta suunnitellun painealueensa ulkopuolella. Tarkasteluun on valittu yleisimpiä käytössä olevia komponenttityyppejä.

3.1 Vastus

Piirikaavioissa vastus merkitään kirjaimella R. Kirjallisuudessa on hieman ristiriitaisuuksia kalvovastuksiin liittyvissä materiaaleissa. *Thick film resistor* ja *metal glaze resistor* ovat molemmat kalvovastuksia mutta valmistustapa on erilainen. Jopa valmistajat käyttävät samalla datalehdellä termejä ristiin ja molempien tavallinen suomenkielinen käännös on paksukalvovastus, joten voi olla vaikea varmistaa tutkittavan komponentin tarkempaa valmistustapaa. Kuvassa 4 on esitettyä paksukalvovastuksen rakenne. SMD-paksukalvovastuksen resistanssi muuttuu vähemmän paineen vaikutuksesta kuin läpiladottavan massavastuksen [27]. Paineenkesto on Zimmermannin ja Grumanin mukaan massavastuksella ainakin 100 MPa ja paksukalvovastuksella 500 MPa.



Kuva 4: Paksukalvovastuksen rakenne. [55]

Painetta kestäväää elektroniikkaa käsittelevissä kirjoituksissa usein viitataan Yhdysvaltain kauppaministeriön 1976 julkaisemaan katselmukseen. Monien komponenttien valmistustekniikat ovat kuitenkin muuttuneet viimeisten 40 vuoden aikana ja tästä syystä katselmuksessa esitettyihin tuloksiin tulee suhtautua varauksella. Zimmermann ja Grumann esittävät, että massavastus reagoi paineeseen 25 kertaa enemmän kuin kalvovastus. Katselmuksessa esitettyä kuvaajaa extrapoloimalla

kertoimeksi saadaan noin 30 verrattaessa massavastusta kalvo- tai lankavastukseen [28, s. 14–15]. Kalvovastuksella muutos 100 MPa:n paineessa on alle 1 %. Kertoimet ovat lähellä toisiaan sekä arvot samankaltaiset. Tällä perusteella katselmuksen mittauksia vastuksista voidaan käyttää arvioinnissa.

Vastuksia arvioitaessa voidaan yleisesti tulkita kalvo- ja lankavastuksien sopivan käytettäväksi 150 MPa:n paineeseen saakka. Massavastus on myös käyttökelpoinen, mikäli melko suuri resistanssin muutos ei häiritse laitteen toimintaa. On myös hyvä huomata, että resistanssi pienenee paineen vaikutuksesta.

3.2 Kondensaattori

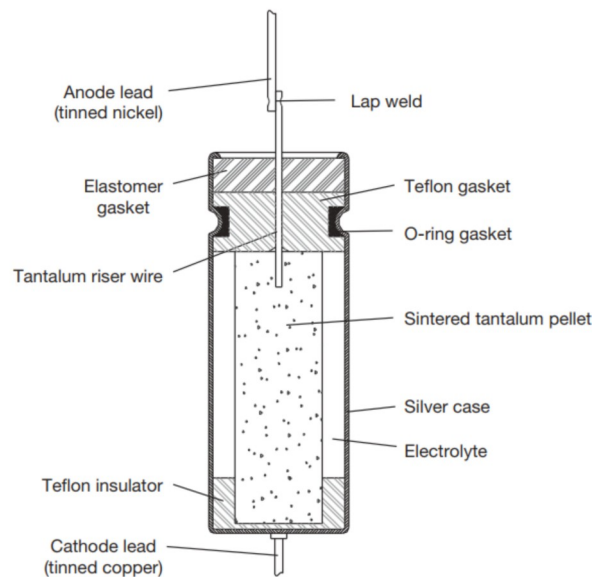
Kondensaattori merkitään kirjaimella C. Paineenkestävyyden kannalta kondensaattorit voidaan jakaa kolmeen ryhmään. Ryhmät on tässä jaoteltu kuiviin ilmatilattomiin, märkää elektrolyyttiä sisältäviin sekä ilmatilallisiin kondensaattoreihin.

Kuivat ilmatilattomat kondensaattorit ovat rakenteensa vuoksi paineenkestoltaan parhaimpia. Keraamiset kondensaattorit sekä kuivat tantaalikondensaattorit ovat toimivia ainakin 70 MPa:n paineeseen asti [28, s. 19]. Paineenkesto ylittää näillä tyypeillä 110 MPa. Bingham ei tarjoa tarkkoja mittauksia vaan toteaa kuvassa olevan Deepsea Challengerin osia. [29] Deepsea Challenger sukelsi 11 km:n syvyyteen [30]. Samankaltainen rakenne on käytössä myös nykyään saatavilla olevissa niobiumkondensaattoreissa [31, s. 408]. Injektiovaletut muovikalvokondensaattorit voivat olla ilmatilattomia tai ilmatilallisia ja tällä taas on suora vaikutus paineenkestävyyteen [29]. Ilmatilattomilla voidaan saavuttaa ainakin 30 MPa:n paine [32]. Keraamisia-, polystyreeni- ja polyesterikondensaattoreita on onnistuneesti käytetty 30 MPa:n ja 34 MPa:n paineissa [33][34].

Elektrolyyttikondensaattoreita pidetään paineenkestoltaan huonoina [29][34]. Binghamin mukaan yleinen alumiinielektrolyyttikondensaattori sisältää myös ilmatilan mikä heikentää paineenkestoa huomattavasti. Barnes ja Gennari esittävät tantaalielektrolyyttikondensaattorin vaihtelevaa reagointia paineeseen. Hetkittäin jopa 20%:n mittausalueen ylityksiä 70 MPa:n paineessa. Tulos on yllättävä, kun tutkitaan kyseisen kondensaattorityypin rakennetta.

Kuvasta 5 ei voida havaita kiinteiden aineiden ja nesteen lisäksi muita kammioita. Mikäli periaatekuvaa voitaisiin suurentaa, havaittaisiin sintrattuun tantaalilytimeen jääneen kammioita joihin elektrolyytineste ei ole päässyt. Uudempia mittauksia ei löydetty. Kyseiset kammiot sekä elektrolyytinesteen ominaisuudet mahdollisesti

selittävät mittaukset. Valmistustekniikka on myös muuttunut tutkimuksen julkaisun jälkeen ja uudemmat kondensaattorit saattavat mahdollistaa paineenalaisen käytön.



Kuva 5: Tantaalelektrolyyttikondensaattori.
[56, s. 2]

Ilmatilalliset kondensaattorit eivät rakenteensa vuoksi kestä suuria paineita. Ympäröivän paineen ollessa vain hieman korkeampi kuin 101 kPa, voidaan näidenkin käyttämisestä kuitenkin harkita tapauskohtaisesti. Ilmatilallisia kondensaattoreita ovat alumiinielektrolyytti-kondensaattorit sekä osa muovikalvokondensaattoreista. Alumiinielektrolyytti-kondensaattorin rakenne ei ole kaasutiivis mutta se ei kuitenkaan mahdollista vapaata paineen tasaamista [31].

3.3 Kela

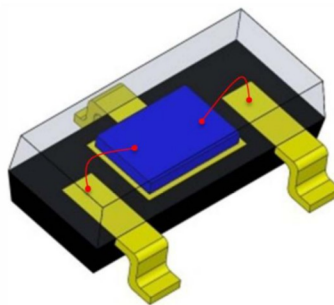
Kela merkitään kirjaimella C ja se koostuu sähkönjohtimesta kahden terminaalien välillä. Se voidaan koteloida hyvin monella tavalla. Muuntajan voidaan myös ajatella olevan kaksi tai useampaa kelaä yhteen koteloituna. Kelan mahdolliset tukirakenteet ja kotelo saattavat olla ainoa rajoittava tekijä. Kestävyys on todettu myös käytännössä 30 MPa:n paineessa [34][35]. Perusrakenteen yksinkertaisuuden takia on luultavaa, että sopivalla tavalla toteutettu kela toimii 150 MPa:n paineessa.

3.4 Puolijohde

Puolijohteiden resistanssi reagoi johteita herkemmin paineen muutoksiin [36, s. 8]. Kun tarkastellaan tyypillisen puolijohdekomponentin epoksikoteloä voidaan arvioida, että itse puolijohteeseen kohdistuva paine on ympäristöään pienempi. On myös havaittu,

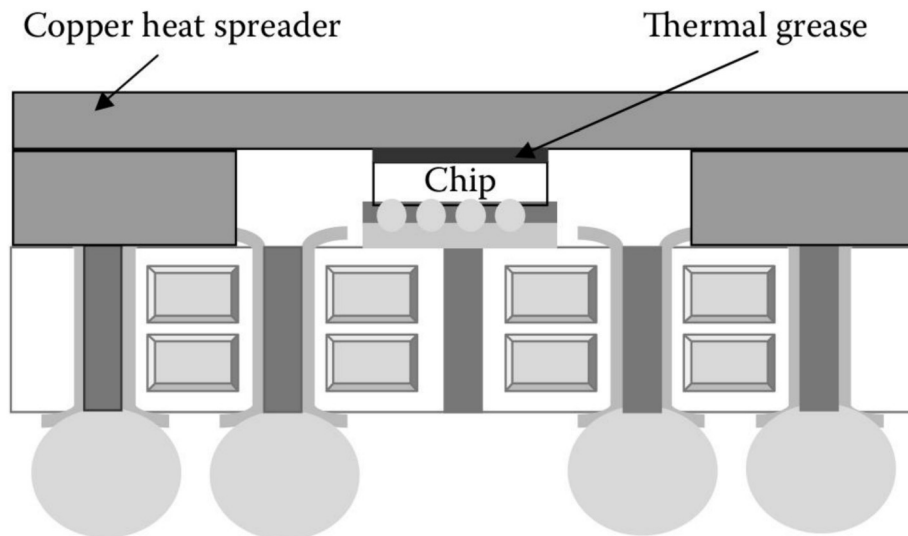
että 30 MPa ei aiheuta merkittäviä muutoksia IGBT- ja diodi-moduulien toimintaan [32, s. 9]. Kokonainen kytkentä, mikä koostui mikrokontrollerista, epoksikoteloiduista diodeista sekä moottoriohjainpiiristä on toistuvasti altistettu 34 MPa:n paineelle onnistuneesti [33]. Onnistuneita kokeita on tehty myös 30 MPa:n paineella [34]. Neljäkymmentä vuotta sitten LED -komponentti altistettiin toistuvasti yli 13 MPa:n paineelle ilman merkittävää muutosta toiminnassa [37]. Testattu LED oli koteloitu ilmeisesti metallikoteloon, jonka rakenteesta ei löydetty tarvittavaa määrää tietoa, jotta sen vaikutusta puolijohteen paineenkestoon olisi voitu arvioida. Uudemmat kokeet 20 MPa:n paineessa vahvistavat LED:n paineenkeston [38]. Korkein raportoitu paine löytyy artikkelista, jossa Creen valmistamien teholedien kerrotaan toimivan 137 MPa:n paineessa [39, s. 33]. Yleisesti puolijohteiden toimintaan 98 MPa:n paine aiheuttaa merkityksettömiä muutoksia [40].

Paineen aiheuttamien häiriöiden arvioimiseksi ei ole kuitenkaan saatavilla tarvittavan laajaa tietoa komponenttien rakenteesta. Myös suurien piirien vaihtelevat valmistustekniikat tekevät yleisestä arvioinnista vaikeaa [41]. Toisinaan käytettävän kolmiulotteisen mikropiirin mekaaninen rakenne on yksinkertaiseen arviointiin liian monimutkainen [42]. Arviointia vaikeuttaa myös valmistajien ja tuotesarjojen väliset erot, jolloin saman tyyppisiä komponentteja voidaan valmistaa monilla eri tavoilla [43]. Toisaalta kuvassa 6 on esimerkkinä esitetty SOT-23 -koteloitu transistori yksinkertaisella rakenteella. Tässä kotelotyyppissä ei ilmatilaa ole, joten toimintaa voidaan arvioida sähköisten ominaisuuksien mukaan.



Kuva 6: SOT-23 -kotelon sisäinen rakenne. [57]

Piiytimen pinnalle asennetaan toisinaan metallinen lämmönjohdin [44, s. 18]. Lämmönjohtimen toteutus voi heikentää paineenkestoa huomattavasti kuten kuvassa 7. Kuvassa 7 on lämmönjohdin ylimpänä. Keskellä sijaitsee piisiru, jonka ympärillä on tyhjää tilaa.



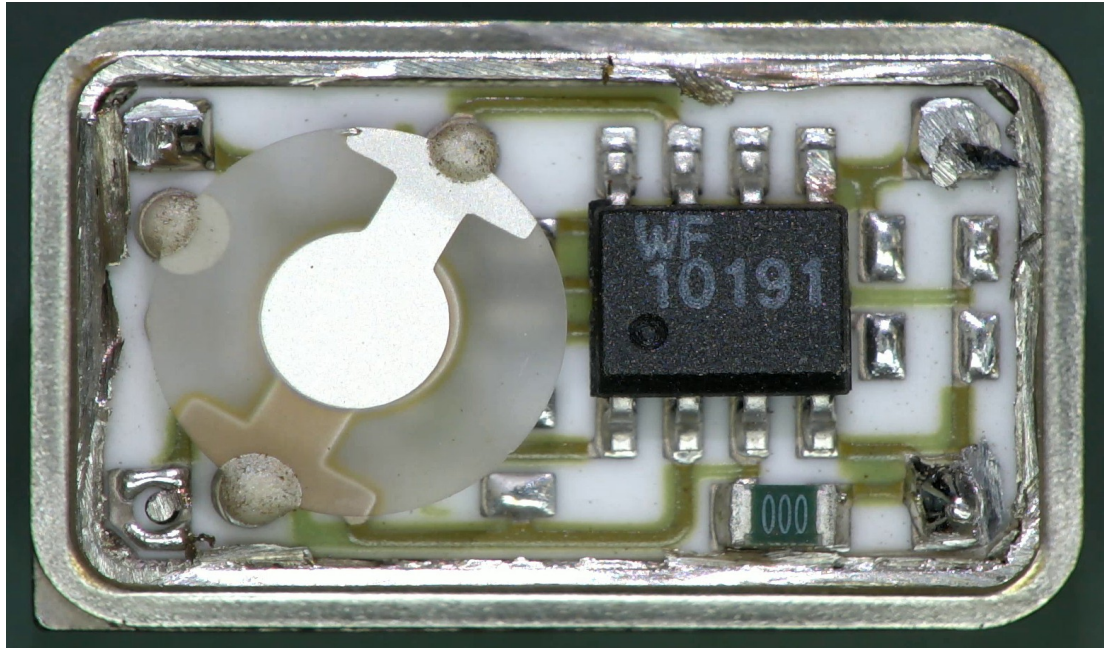
Kuva 7: Mikropiiri jonka ympärillä on kaasutila BGA-kotelossa. [44, s. 105]

Valmistusteknisistä syistä osa lämmönjohtimista on varustettu reiällä [45]. Tällöin paine pääsee tasaantumaan kotelon sisällä eikä kotelo rajoita paineenkestävyyttä. Piisiru ja lämmönjohdin voidaan myös koteloida yhteen siten että valmiissa tuotteessa ei ole ilmatilaa [44, s. 94].

Puolijohteita koteloidaan eri muovien lisäksi metalliin, lasiin ja keraamiin [44, s. 133]. Tällöin kotelo kuitenkin yleensä sisältää ilmatilan mikä itsessään heikentää paineenkestävyyttä mutta ei välttämättä estä toimintaa [46]. Vakiomallinen keraaminen IC-kotelo on todettu sopimattomaksi 207 MPa:n paineeseen [47]. Käytännössä puolijohteiden toimimattomuuden aiheuttaa useimmiten komponentin mekaaninen kotelointi, eikä itse puolijohteen toimimattomuus paineenalaisena.

3.5 Oskillaattori

Oskillaattorin värähtelijänä voidaan käyttää piezosähköistä kidettä [19, s. 518]. Kide ei aina ole hermeettisesti suljettu mikä voi aiheuttaa ongelmia öljyssä [48]. Metallikuorinen kide jätetään usein pois painekokeista oletetun kestävyysperusteella [33]. Kuvassa 8 on esitettyä metallikuorinen oskillaattori auki leikattuna. Kuvasta käy ilmi kotelon suuri ilmatila.



Kuva 8: Auki leikattu oskillaattori, josta on nähtävissä suuri ilmatila. [58]

Kuitenkin metallikuorinen sekä metallikansinen kide on toiminut toistuvasti 2 MPa:n paineessa [49]. Tieto kiteiden koteloiden tyypistä arvioitiin valmistajan verkkosivuilla olevien epätarkkojen valokuvien perusteella [50]. Keraamiin ja metalliin koteloidun oskillaattorin on todettu toimivan 60 MPa:n paineessa, jolloin ainoastaan signaali on vaimentunut vaikka kotelon kansi on romahtanut [46]. Vaimentunut signaali estää useiden kytkentöjen toiminnan. Vaimenemaa ei artikkelissa esitetä paineen funktiona, joten rajoittavan paineen arviointiin ei tarjota keinoja. Kuvassa 10 on esitettyä muutamien oskillaattoreiden käyttäytymistä paineessa.

COMPARISON OF EVALUATED OSCILLATORS AND THEIR SIGNAL OUTPUT AT 600 BAR AMBIENT PRESSURE

Oscillator	Frequency	Type	Package Type	Remaining signal at 600 bar
Epson Toyocom SG-310SCF	20.00 MHz	Quartz	Plastic	5 %
Fox Xpress0	20.00 MHz	Quartz	Kovar	30 %
Aker 23305-20.000-X	20.00 MHz	Quartz	Metal and Ceramics	62 %
Epson Toyocom SG-9001LB	20.00 MHz	QMEMS	Plastic	63 %
SiTime SIT8002AI-13-33E-20.00000T	20.00 MHz	MEMS	Plastic	84 %
Maxim DS1077U-100+	100.00 MHz	Solid-State	Plastic	88 %

Kuva 9: Signaalin suhteellinen voimakkuus eri oskillaattoreilla 60 MPa paineessa. [46]

Samassa artikkelissa ei havaittu muutosta taajuudessa, vaikka Aker:n oskillaattorilla signaali oli vaimentunut 37 %, kun odotettavissa olisi ollut taajuuden nousu [23][51]. Muiden oskillaattorien taajuuden muutosta ei esitetty. Mittausjärjestelyä eivät Kampmann ja muut kuvanneet. Tulokset ovat yllättävät taajuuden muutoksen osalta, jonka vuoksi mittauksiin on syytä suhtautua varauksella. Artikkelissa mainitut mikroelektromekaaninen resonaattori sekä puolijohdeoskillaattori ovat vaimentuneet alle 20 % ja tällä perusteella niitä voidaan pitää toimivina.

Oskillaattorin värähtelijänä voi olla myös pietsosähköinen keraaminen resonaattori. Se on rakenteeltaan umpinainen ja toimii ainakin 34 MPa:iin asti [33]. Kvartsikiteen tapaan sen resonanssitaajuus luultavasti reagoi paineen muutokseen resonaattorin jäykistyessä vaikka koetuloksia tästä ei löydettykään.

Mikroelektromekaaniset oskillaattorit ovat uusi mutta nopeasti kasvava vaihtoehto perinteisemmille värähtelijöille [52][53]. Värähtelijän vaatima vapaa tila on pieni, jolloin koteloon kohdistuvat rasitukset eivät siirry itse elementtiin yhtä helposti kuin suurempia elementtejä käytettäessä. Mittauksia paineenkestosta ei löydetty Kampmann ym. [46] lisäksi. Tikitin Oy valmistaa tällä hetkellä pienimmät MEMS-resonaattorit, joiden resonaattorielementin suurin pituus on 300 μm . Yksi yrityksen perustajista, Aarne Oja, arvioikin että sopivaan koteloon valmistettaessa useamman sadan ilmakehän paine on mahdollinen [54].

4. YHTEENVETO

Keinoja peruskomponenttien paineenkestävyyden arviointiin löytyi sekä lujuuslaskennasta ja elektromekaniikasta kuten myös julkaistuista testituloksista. 30 MPa on melko hyvin saavutettavissa ja joillekin komponenteille huomattavasti suuremmat paineet ovat mahdollisia. Elektrolyyttikondensaattorit ovat erittäin yleinen komponentti, jolla paineenkestoa ei juurikaan ole. Kapasitanssin lisääminen erityyppisillä kondensaattoreilla on kuitenkin usein mahdollista. Myös kellosignaalin tuottaminen muodostuu nopeasti ongelmaksi paineen kasvaessa. Joissakin järjestelmissä kiteen korvaaminen vaihtoehtoisilla komponenteilla ei ole mahdollista. Mahdollisuus on kuitenkin olemassa, että komponentit toimivat vaikka kotelo osittain rikkoutuisikin.

Kun komponenttien tarkoilla arvoilla on suuri merkitys esimerkiksi mittaus- tai referenssitehtävissä, täytyy paineenkestoon suhtautua kriittisemmin. RC-piirin aikavakion muutoksen suuntaa ja suuruutta on vaikea arvioida täsmällisesti tässä työssä löydetyillä keinoilla, kun resistanssi pienenee ja kapasitanssi kasvaa. Lähtökohtana voi pitää, että tarkkuusvaatimuksen kasvaessa paineenkestävyys heikkenee.

Taulukkoon 4 on kerätty tässä työssä löydettyjen mittausten tuloksia eri komponenttiryhmistä. Komponentit on nimetty ryhmänsä mukaan arviointia helpottamaan. On kuitenkin todennäköistä, että jokaisesta ryhmästä löytyy paineenkestävyydeltään parempia ja huonompia komponentteja.

Taulukko 4: Suurimmat testatut paineet jossa komponentit toimivat.

Komponentti	Testattu paine (MPa)	Lähde
Paksukalvovastus	500	[27]
Massavastus	100	[27]
Lankavastus	70	[28]
Keraaminen kondensaattori	70	[28]
Kuiva tantaalikondensaattori	70	[28]
Kuiva tantaalikondensaattori	110	[29]
Ilmatilaton polyesterikondensaattori	34	[33]
Ilmatilaton polystyreenikondensaattori	30	[34]
Kela	30	[34][35]
IGBT	30	[32]
Diodi	34	[33]
Mikrokontrolleri	34	[33]
Teho-LED	137	[39]
Metallikoteloineen kide	2	[49]
Metallikantinen kide	2	[49]
MEMS -oskillaattori	60	[46]
Puolijohdeoskillaattori	60	[46]
Keraaminen resonaattori	34	[33]
Märkä tantaalikondensaattori	0,1	[28]
Alumiinielektrolyyttikondensaattori	0,1	[29][34]

Työn alussa valittiin tarkasteltavan painealueen ylärajaksi 150 MPa. Näin korkealla paineella on komponentteja testattu harmittavan vähän, vaikka tuloksiakin löytyi. Useissa artikkeleissa oli havaittavissa valokuvista, että muitakin kuin raportoituja komponentteja on käytetty onnistuneesti paineessa. Tämä on rohkaisevaa painetta kestäväen elektronikan suunnittelun kannalta.

LÄHTEET

- [1] T. Paraskova, Global Oil & Gas Drilling Set To Surge In 2019, Yerepouni Daily News, 04.03.2019.
- [2] J. Vähä-Koskela, "Hermes murtaa jäätä ja imuroi öljyt hylyistä," Turun Sanomat, 04.08.2016.
- [3] S. Schildt, Sukeltajarobotit tutkimaan vedellä täyttyneitä kaivoksia, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 28.4.2019): <http://www.tut.fi/rajapinta/artikkelit/2016/2/sukeltajarobotit-tutkimaan-vedella-tayttyneita-kaivoksia>.
- [4] T. Katko and B. Højris, Finnish Water Services: Experiences in Global Perspective, IWA Publishing, London, UNITED KINGDOM, 2017.
- [5] Edistysellinen anturitekniikka siivittää trimaraanin ennätysvauhtiin, FLUID Finland, No. 2, 2017, s. 88-89.
- [6] H. D. Young, R. A. Freedman, University physics with modern physics, 14. global ed. Pearson, USA, 2016.
- [7] T. J. Shankland, A. G. Duba, E. A. Mathez, C. L. Peach, Increase of electrical conductivity with pressure as an indicator of conduction through a solid phase in midcrustal rocks, Journal of Geophysical Research B: Solid Earth, vol. 102, no. 7, 1997, pp. 14741–14750.
- [8] J. V. Gardner, A. A. Armstrong, B. R. Calder, J. Beaudoin, So, How Deep Is the Mariana Trench?" Marine Geodesy, vol. 37, no. 1, 2014, pp. 1–13.
- [9] F. J. Keller, W. E. Gettys, M. J. Skove, Physics : classical and modern, 2nd ed. McGraw-Hill, New York, USA, 1993.
- [10] M. A. Hopcroft, W. D. Nix, T. W. Kenny, What is the Young's Modulus of Silicon?, Journal of Microelectromechanical Systems, vol. 19, no. 2, 2010, pp. 229–238.
- [11] F. Cardarelli, Materials Handbook: A Concise Desktop Reference, Springer, London, UNITED KINGDOM, 2008.
- [12] ASM International, Characterization and Failure Analysis of Plastics, ASM International, Materials Park, USA, 2003.
- [13] G. Pahl, W. Beitz, J. Feldhusen, K.-H. Grote, Engineering Design, Springer London, London, United Kingdom, 2007.
- [14] R. D. Christ, R. L. Wernli, The ROV Manual, Elsevier, USA, 2014.
- [15] R. Huston, H. Josephs, Practical Stress Analysis in Engineering Design Third Edition, CRC Press, USA, 2008.
- [16] B. Sundqvist, G. Backstrom, Thermal Conductivity of Copper Under High Pressure, High Temperatures - High Pressures, vol. 9, no. 1, 1977, pp. 41–48.
- [17] P. Maheshwari, Electronic Components and Processes, New Age International, Daryaganj, INDIA, 2000.

- [18] M. I. Panzini, *Thick Films: Properties, Technology, and Applications*, Nova Science Publishers Inc, New York, 2012.
- [19] N. Storey, *Electronics: A Systems Approach*, 6th New edition, Pearson Education UK, Harlow, England, 2017.
- [20] S. Li, W. Wang, S. Yu, H. Sun, Influence of hydrostatic pressure on dielectric properties of polyethylene/aluminum oxide nanocomposites, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 21, no. 2, Apr 2014 pp. 519–528.
- [21] M. M. Gadzhaliev, M. I. Daunov, A. M. Musaev, Dependence of the permittivity of direct gap semiconductors on hydrostatic pressure, *J. Exp. Theor. Phys.*, vol. 121, no. 2, Aug 2015 pp. 263–266.
- [22] Piezoelectric properties of ceramic materials and components. Methods of measurement. Low power, BS EN 50324-2:2002, 2002.
- [23] V. M. Upadhye, S. D. Agashe, Effect of Temperature and Pressure on the Thickness Mode Resonant Spectra of Piezoelectric Ceramic, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 225, Aug. 2017, p. 12125.
- [24] H. Jin, S. R. Dong, J. K. Luo, W. I. Milne, Generalised Butterworth-Van Dyke equivalent circuit for thin-film bulk acoustic resonator, *Electronics Letters*, vol. 47, no. 7, Mar. 2011, pp. 424–426.
- [25] S. Sherit, H. D. Wiederick, B. K. Mukherjee, Accurate equivalent circuits for unloaded piezoelectric resonators, in *1997 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings. An International Symposium (Cat. No.97CH36118)*, Toronto, Canada, 1997, vol. 2, pp. 931–935.
- [26] I. S. Uzunov, M. D. Terzieva, B. M. Nikolova, D. G. Gaydazhiev, Extraction of modified butterworth — Van Dyke model of FBAR based on FEM analysis, in *2017 XXVI International Scientific Conference Electronics (ET)*, Sozopov, Bulgaria, 2017, pp. 1–4.
- [27] G. Zimmermann, H. Grumann, Fast SMD Resistor Based Pressure Gauge, *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, vol. 25, no. 2, 200, pp. 59–65.
- [28] H. E. Barnes, J. J. Gennari, *A Review of Pressure-Tolerant Electronics (PTE)*, Naval Research Lab, Washington DC, USA, 1976.
- [29] N. Bingham, Designing pressure-tolerant electronic systems, 2013, Verkkosivu. Saataavissa (viitattu 12.03.2019): <https://www.uutech.com/ptepaper/>.
- [30] K. Hardy, B. Sutphen, J. Cameron, Technology Of The Deepsea Challenge Expedition (part 2 of 3: Deepsea Challenger),” *Ocean News & Technology*; Palm City, vol. 20, no. 7, Jul. 2014, pp. 36–38.
- [31] R. P. Deshpande, *Capacitors*, McGraw-Hill Education, New York, USA, 2015.
- [32] R. Pittini, M. Hernes, K. Ljoekelsoey, Pressure Tolerant Power Electronics: IGBT Gate Driver for Operation in High Pressure Hydrostatic Environment, *Journal of Energy and Power Engineering*, vol. 6, no. 9, Sep. 2012, pp. 1500–1508.
- [33] R. R. Costa, N. R. S. dos Reis, Liu Hsu, A. J. Peixoto, P. C. S. Gomes, Robotized system for in-pipe inspection, in: *2003 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (Cat. No.03TH8692)*, vol. 2, 2003, pp. 1021–1025.

- [34] P. Snary, C. Bingham, D. A. Stone, N. Schofield, Drive systems for operation on deep-sea ROVs, Institution of Electronic and Electrical Engineers, Lincoln, United Kingdom, Jan. 2003.
- [35] M. Hernes, R. Pittini, Enabling pressure tolerant power electronic converters for subsea applications, in: 2009 13th European Conference on Power Electronics and Applications, 2009, Barcelona, Spain, pp. 1–10.
- [36] W. M. Murray, W. R. Miller, The Bonded Electrical Resistance Strain Gage: An Introduction, Oxford University Press, New York, USA, 1992.
- [37] D. Gilbert, E. Manes, F. Allard, Analysis of the Performance of a Pressure-Tolerant Light-Emitting Diode/Fiber Optic Cable Interface, in: OCEANS '80, 1980, Seattle, USA, pp. 440–444.
- [38] L. R. McBride, J. T. Scholfield, Solid-State Pressure-Tolerant Illumination for MBARI's Underwater Low-Light Imaging System, Journal of Display Technology, vol. 3, no. 2, Jun. 2007, pp. 149–154.
- [39] M. Olsson, K. Hardy, J. Sanderson, Underwater Applications of High-Power Light-Emitting Diodes, Sea Technology; Arlington, vol. 48, no. 8, Aug. 2007, pp. 31–34.
- [40] J. Holzschuh, Pressure tolerant electronics, in: Ocean '74 - IEEE International Conference on Engineering in the Ocean Environment, Halifax, Canada, 1974, pp. 190–194.
- [41] W. J. Greig, Ed., Flip Chip Assembly, in: Integrated Circuit Packaging, Assembly and Interconnections, Springer US, Boston, USA, 2007, pp. 169–191.
- [42] D. Zhang, J. J.-Q. Lu, 3D Integration Technologies: An Overview, in: Materials for Advanced Packaging, Springer International Publishing, Switzerland, 2017, pp. 1–26.
- [43] Z. Zhang, P. Zhu, C. P. Wong, Flip-Chip Underfill: Materials, Process, and Reliability, in: Materials for Advanced Packaging, Springer International Publishing, Switzerland, 2017, pp. 331–371.
- [44] A. Chen, R. H.-Y. Lo, Semiconductor Packaging: Materials Interaction and Reliability. CRC Press, Boca Raton, USA, 2016.
- [45] Wikimedia Commons contributors, Intels broadwell i7 6800k processor detailed photo, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 02.08.2019):
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Intel_i7_6800k_cpu.jpg.
- [46] P. Kampmann, J. Lemburg, H. Hanff, F. Kirchner, Hybrid pressure-tolerant electronics, in: 2012 Oceans, Hampton Roads, USA, 2012, pp. 1–5.
- [47] E. P. J. Rong, I M. Riko, A. Sharif, W. C. Cheong, C. Zhong, D. R. MinWoo, G. C. Lip, Electronic packages for high pressure applications: A dome-shaped cavity design, in: 2013 IEEE 63rd Electronic Components and Technology Conference, Las Vegas, USA, 2013, pp. 2342–2348.
- [48] Notice for soldering and mounting | Crystal Units | Murata Manufacturing Co., Ltd., verkkosivu. Saatavissa (viitattu 02.07.2019):
<https://www.murata.com/en-us/products/timingdevice/crystalu/technical/notice>.
- [49] E. Sollesnes, O. M. Brokstad, R. K. Boe, B. Vågen, A. Carella, A. Alcocer, A. P. Zolich, T. A. Johansen, Towards autonomous ocean observing systems using Miniature Underwater Gliders with UAV deployment and recovery capabilities, in: 2018 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicle Workshop (AUV), Porto, Portugal, 2018, pp. 1–5.

- [50] Moteino MEGA. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 09.07.2019):
<https://lowpowerlab.com/shop/product/119>.
- [51] S. Safour, Y. Bernard, Static force transducer based on resonant piezoelectric structure: root cause investigation, "Smart Mater. Struct.", vol. 26, no. 5, Apr. 2017, p. 55012.
- [52] A. Jaakkola, Piezoelectrically transduced temperature compensated silicon resonators for timing and frequency reference applications, väitöskirja, VTT and Aalto University, VTT Science 122, 2015.
- [53] A. Uranga, J. Verd, N. Barniol, CMOS–MEMS resonators: From devices to applications, Microelectronic Engineering, vol. 132, Jan. 2015, pp. 58–73.
- [54] A. Oja, toimitusjohtaja, Tikitin Oy, painetta sietävä elektronikka ja Tikitin BEAT, sähköpostikeskustelu 05.07.2019.
- [55] RND Components Thick Film SMD Resistors, 02-Mar-2016, Saatavissa (haettu 02.03.2019):
https://www.elfadistelec.fi/Web/Downloads/_t/ds/rnd_smd_resistors_eng_tds.pdf.
- [56] M. Mosier, Wet Electrolyte Tantalum Capacitors: An Introduction to the Basics, Document Number: 40021, Vishay Intertechnology, Inc., 19-Apr-2018, Saatavissa:
<https://www.vishay.com/doc?40021>
- [57] W. Li, H. Chen, J. Han, K. Xue, F. Wong, I. Shiu, G. Cheng, J. Wu, Effects of copper plating thickness of Ni/Fe alloy leadframe on the thermal performance of Small Outline Transistor (SOT) packages, in: 2012 13th International Conference on Electronic Packaging Technology High Density Packaging, Guilin, China, 2012, pp. 385–388.
- [58] Wikimedia Commons contributors, Inside a modern DIP package quartz crystal oscillator module, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 02.08.2019):
https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Crystal_Oscillator_DIP_Module_Teardown.png&oldid=303479691.